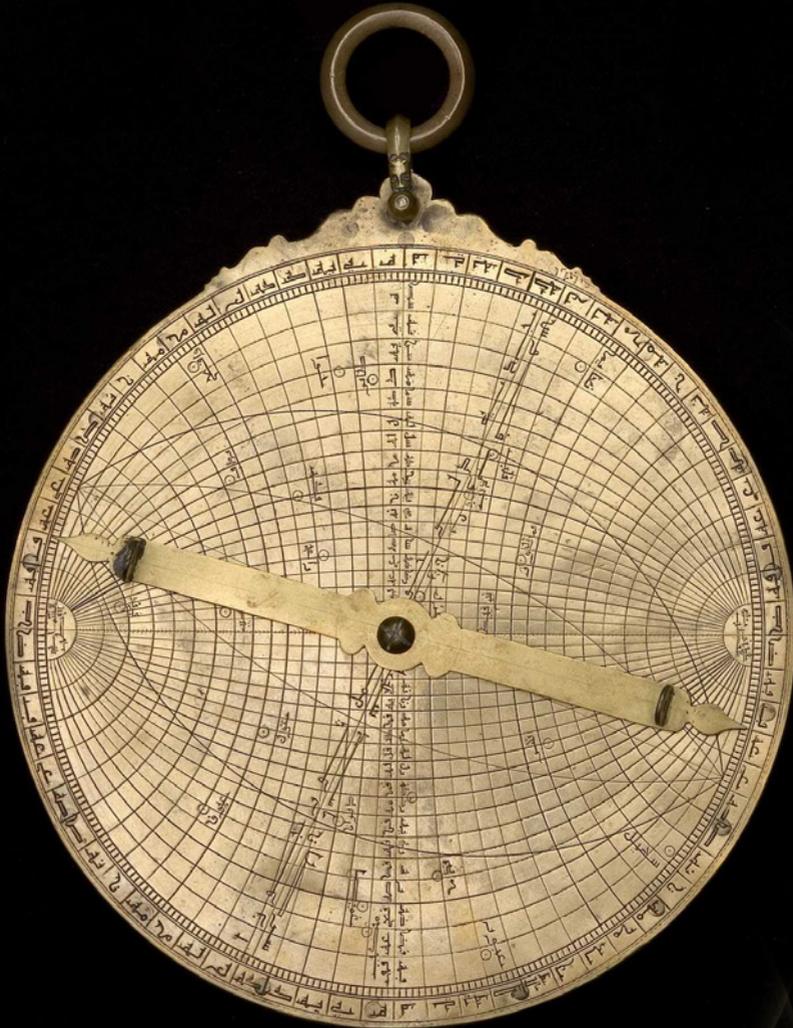


Le Ciel

Société astronomique de Liège
mars 2012

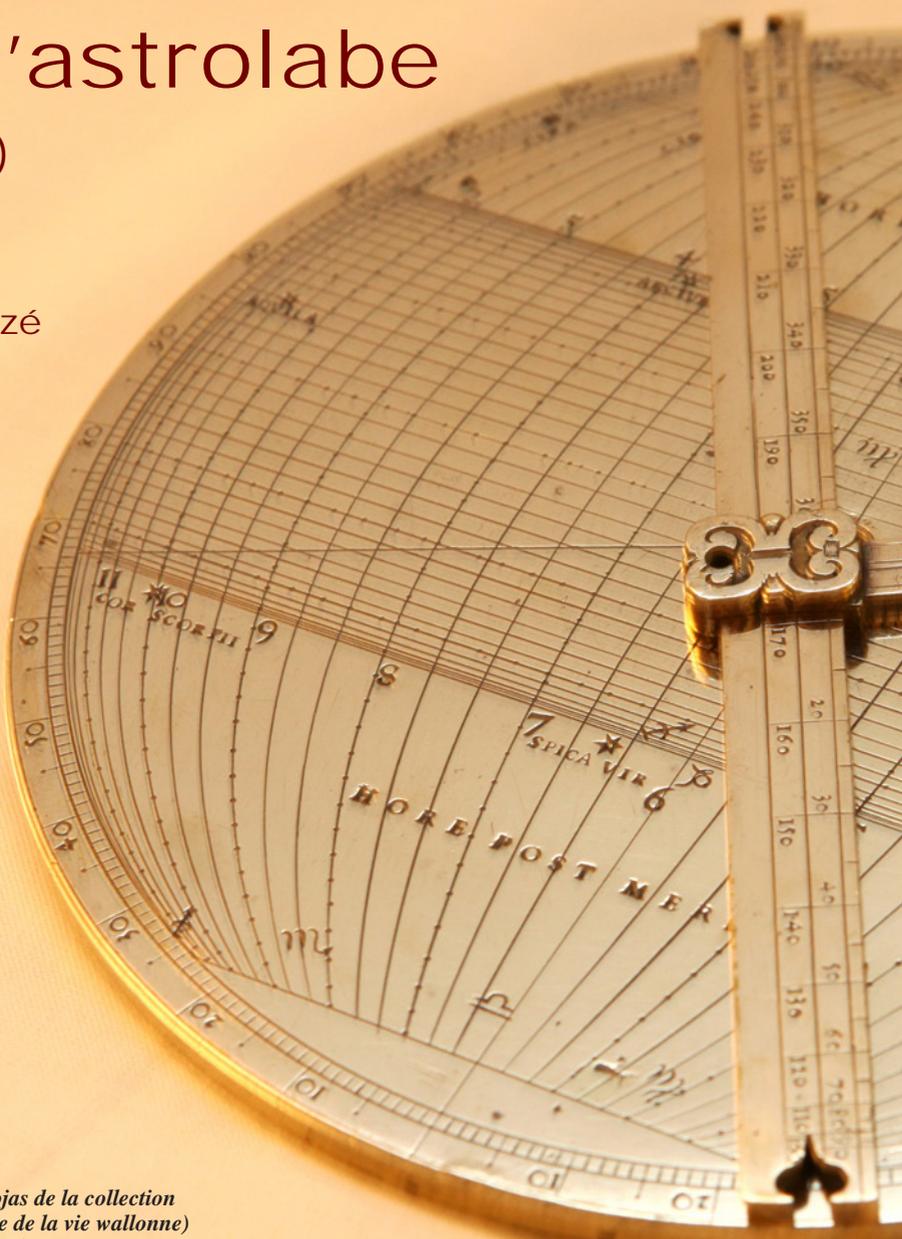


Mensuel (ne paraît pas en juillet-août)

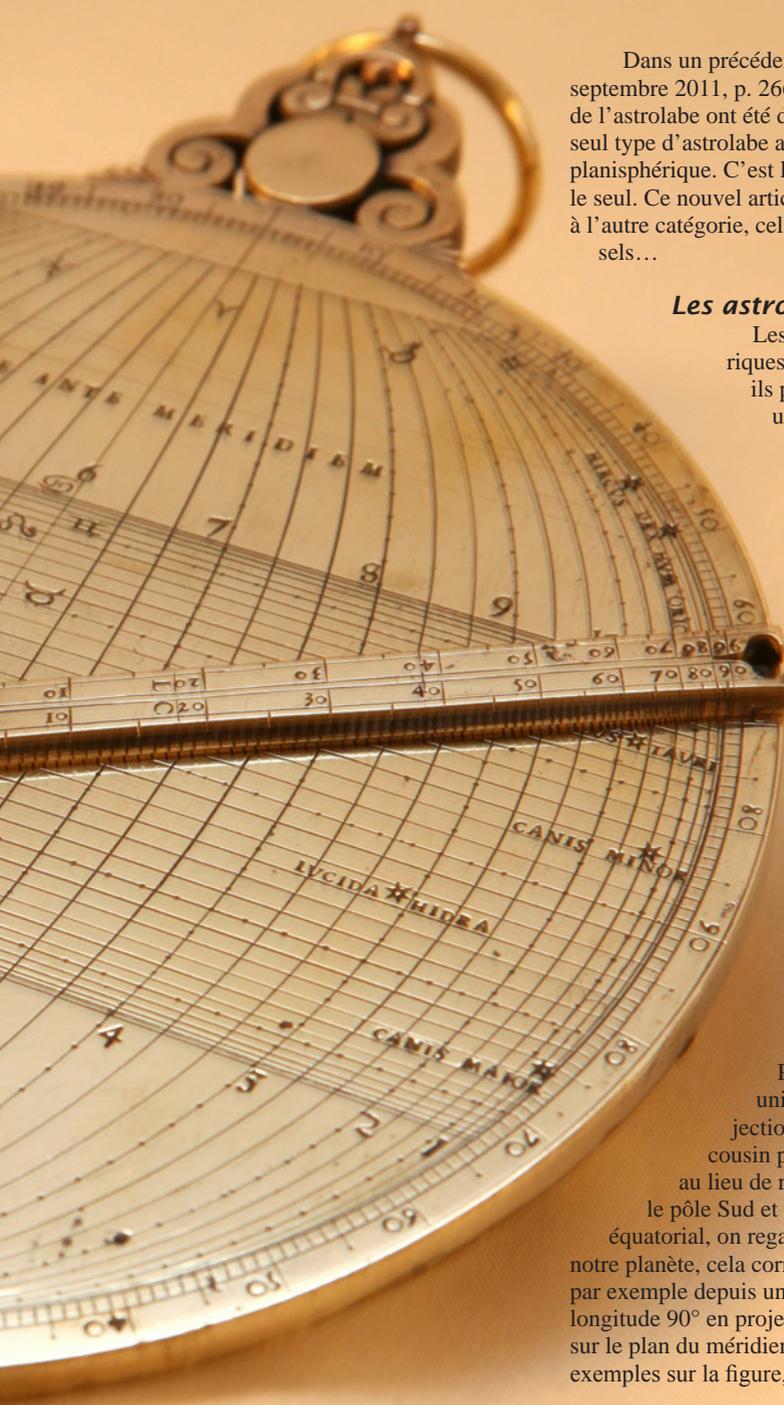
Éditeur responsable : Jean Manfroid, avenue de Cointe, 5 4000 Liège Numéro d'agrément P701237

Les secrets de l'astrolabe (suite)

Yaël Nazé



*Astrolabe de Rojas de la collection
Elskamp (musée de la vie wallonne)
(© M. Houet/ULg)*



Dans un précédent article (*Le Ciel* de septembre 2011, p. 266), quelques petits secrets de l'astrolabe ont été dévoilés. Toutefois, un seul type d'astrolabe a été évoqué : l'astrolabe planisphérique. C'est le plus courant, mais pas le seul. Ce nouvel article tente de vous initier à l'autre catégorie, celle des astrolabes universels...

Les astrolabes universels

Les astrolabes planisphériques sont très bien, mais ils possèdent quand même un (gros) défaut. Pour le voyageur (qui est aussi le premier utilisateur de ce genre d'engins), il faut emporter toute une tripotée de tympan différents, et choisir le bon en fonction de sa position, à recalculer régulièrement... tout cela n'est pas très pratique.

L'astrolabe universel résout ce problème.

Comme son nom l'indique, il peut être utilisé partout... et ce avec un seul tympan !

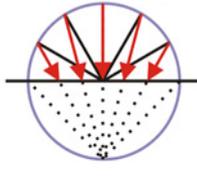
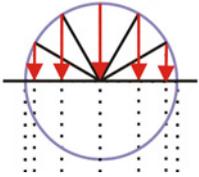
Pour ce faire, l'astrolabe universel utilise une projection du ciel, comme son cousin planisphérique. Toutefois, au lieu de regarder le ciel depuis le pôle Sud et de projeter sur le plan équatorial, on regarde « de côté ». Pour notre planète, cela correspondrait à regarder par exemple depuis un point de l'équateur de longitude 90° en projetant la surface terrestre sur le plan du méridien de Greenwich (voir exemples sur la figure, page suivante).



Orthographique



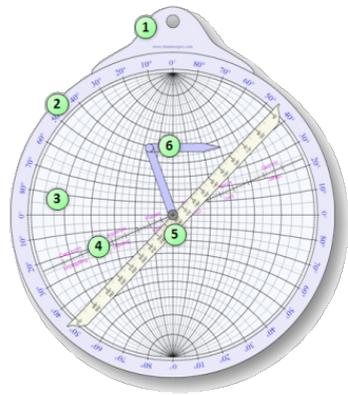
Stérogaphique



Comment représenter une sphère, objet 3D, sur un plan, objet 2D ? On peut par exemple utiliser la projection stéréographique (droite) et orthographique (gauche). Voici deux exemples pour la Terre. Dans le premier cas, l'observateur se place sur un point équatorial de longitude 70° Est, avec projection sur le plan comprenant les méridiens de longitude 160° Est et 20° Ouest. Dans le deuxième cas, le plan de projection est identique, mais l'observateur se trouve infiniment loin. La différence principale est donc la position de l'observateur (bas), ce qui conduit à une géométrie différente des projections de parallèles et méridiens – remarquer le resserrement au bord ou au centre selon le cas (© 2008 C.A. Furuti)

Cette solution a été découverte au milieu du 11^es. par un juif andalou/de Tolède appelé Ibn-al-Zaqallu (ou Arzaquiel, 1028-1087). Cet astrolabe universel s'appelle donc logiquement « saphæa arzechalis ». Elle a été redécouverte¹ cinq siècles plus tard par un astrolabiste célèbre de Louvain, Gemma Frisius (1508-1555). L'engin, réalisé par Arsénius, cousin de Frisius, est alors commercialisé sous le nom d'« astrolabe catholique ».

À la même époque, l'Espagnol Juan de Rojas (17^es.), ami et élève de Frisius, propose

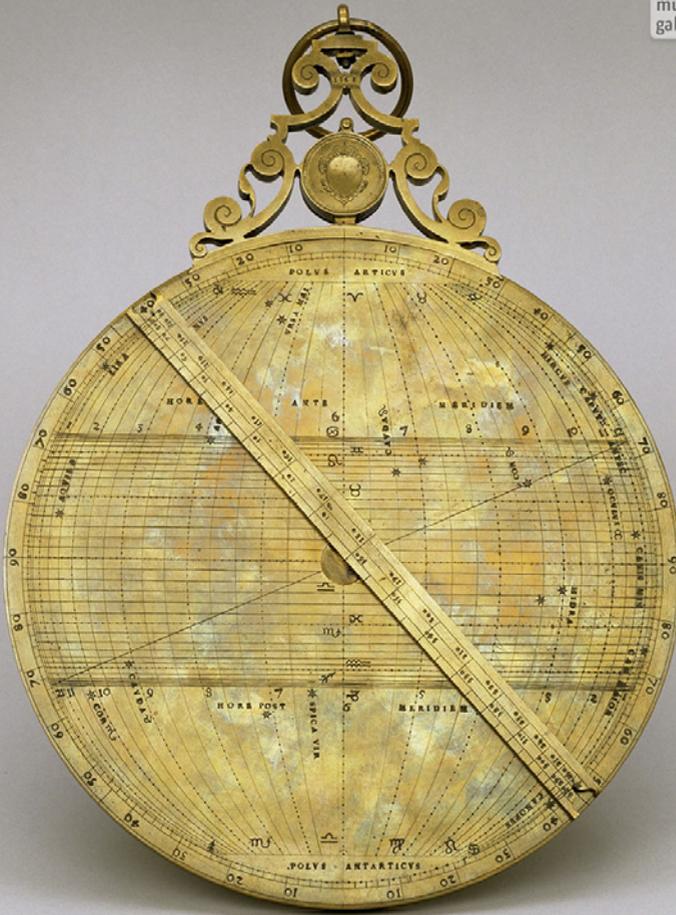


Comme pour un astrolabe planisphérique, on tient l'astrolabe universel par le trône (1). Le limbe, bord de la matrice, est gradué en degrés (2), le tympan (3) comporte des lignes verticales et horizontales, et une ligne graduée en mois ou signes du zodiaque (4) indique la position de l'écliptique dans le repère équatorial. Le marqueur mobile se compose d'une regula graduée (5) et d'un brachiolus (6) permettant de repérer la position d'un astre. (© www.shadowspro.com)



Saphea construite au milieu du 16^es. en Angleterre. (© Museo Galileo). Voir aussi la photo en couverture.

¹ En l'absence de preuve certaine de transmission directe, on suppose que les deux découvertes sont indépendantes



Astrolabe de Rojas construit au 16^e s. en Italie (© Museo Galileo)

une solution alternative : l'astrolabe de Rojas. Cette solution utilise une projection orthographique plutôt que stéréographique (celle des astrolabes planisphériques, expliquée dans l'article précédent et figure page ci-contre). L'observateur n'est plus situé au pôle Sud,

comme pour l'astrolabe classique, ou en un point de l'équateur de la sphère céleste, comme pour la Sapha, mais à distance infinie. L'intérêt est que les lignes de hauteur ou déclinaison sont désormais des droites parallèles.

Ces deux solutions ont néanmoins un petit problème. En effet, regardez leur tympan respectif (figures ci-contre) : alors que les lignes de repères sont au départ séparées par des intervalles angulaires identiques, leurs projections se rapprochent au centre de la Sapha ou s'écrasent au bord de l'astrolabe de Rojas. Conclusion : quel que soit votre choix, il y aura toujours un coin du ciel où vous serez moins précis. Un siècle plus tard, le Français Philippe de la Hire (1640-1718) résout ce problème, en plaçant l'observateur à une distance finie, entre le pôle Sud et l'infini.

Chez lui, toutes les projections sont équidistantes.

Quel que soit votre choix, le tympan gradué ne suffit pas. Pour travailler, il faut ajouter un marqueur mobile, comme pour l'astrolabe « classique » ! Pour l'astrolabe universel, ce marqueur est composé de deux parties : une *regula*, pièce droite couvrant la largeur de l'astrolabe et qui ne peut que tourner autour du centre, et un *brachiolus*, petit bras articulé

(pour la Saphea), ou une réglette cou-
lissant sur la regula (pour l'astrolabe de
Rojas). Ce brachiolus permet de pointer
n'importe quel point du tympan.

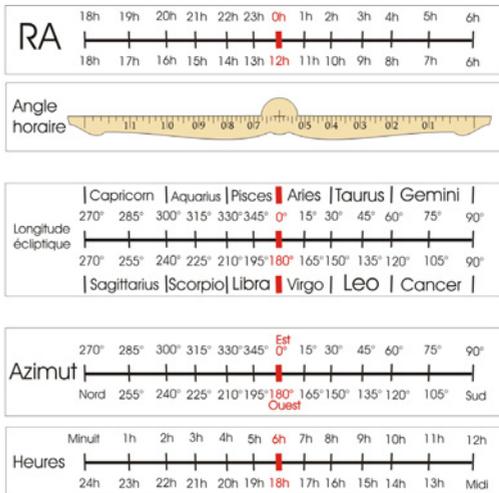
Comment ça marche ?

Les plans d'un astrolabe universel
sont plus difficiles à trouver que celui
d'un astrolabe planisphérique. Deux
possibilités gratuites : utiliser le logiciel
ShadowsPro pour obtenir une Saphea
ou <http://www.planetarium-provence.com>,
où la partie « histoire de l'astro-
nomie » fournit les plans de la Saphea
et de l'astrolabe de Rojas (voir aussi
pour une version interactive, [http://www.
autodidacts.f2s.com/astro/index.html](http://www.autodidacts.f2s.com/astro/index.html)).
Comme pour l'article précédent, il serait
judicieux d'en réaliser un pour lire la
suite et mieux comprendre les diverses
fonctionnalités de l'engin.

La première chose à comprendre à pro-
pos des astrolabes universels est leur versatili-
té. Les lignes qui s'y croisent peuvent en effet
représenter plusieurs choses :

1. un repère équatorial – les arcs
horizontaux sont alors gradués en déclinaison
(les degrés notés sur le bord) et les verticaux
en ascension droite (RA, heures ou degrés
mesurés le long de la regula). Dans ce cas, on
observe la sphère céleste depuis le point vernal
(croisement de l'écliptique et de l'équateur)
et on projette le ciel sur le plan contenant les
positions sur l'écliptique du Soleil aux solsti-
ces (un plan appelé « collure des solstices »).
La ligne horizontale centrale représente alors
l'équateur céleste, et les points vers lesquels
convergent toutes les arcs verticaux les pôles
célestes nord (en haut) et sud (en bas).

2. un repère écliptique – les arcs hori-
zontaux sont alors gradués en latitude éclipti-
que (sur la regula) et les verticaux en longitude
écliptique. Dans ce cas, point d'observation
et plan de projection sont identiques au cas
précédent, mais la ligne horizontale centrale
représente désormais l'écliptique et les points
de convergence les pôles écliptiques nord et
sud.



*Les différentes graduations de la regula pour
une Saphea, en fonction du choix du repère.
L'angle horaire correspond à l'angle, en
heures, entre le méridien Nord-Sud et l'astre
choisi, le long de l'équateur. Les heures
correspondent aux heures solaires moyennes
– le Soleil est au Sud à midi, à l'Est à 6h et à
l'Ouest à 18h.*

3. un repère local – les arcs hori-
zontaux sont alors gradués en hauteur au-dessus
de l'horizon et les verticaux en azimut. Dans
ce cas, on observe la sphère céleste locale
depuis le point de situé exactement à l'Est sur
l'horizon et on projette le ciel sur le plan du
méridien Nord-Sud. La ligne horizontale cen-
trale représente l'horizon, et les deux points de
convergence le zénith et son opposé, le nadir.

Une autre pièce importante du puzzle est
de se souvenir que l'on voit les deux côtés du
ciel en même temps... Autrement dit, on voit
le devant et l'arrière de la sphère céleste, ce
qui fait que les graduations possèdent toujours
deux significations ! À l'utilisateur de savoir
si l'on parle du matin ou de l'après-midi, du
mois de novembre (signe du Scorpion) ou de
celui de février (signe du Verseau), de 3h ou
de 9h d'ascension droite... Bref, la vie n'est
pas simple...

Voyons maintenant comment utiliser cet astrolabe universel.

a) Conversion de coordonnées

Le changement de coordonnées représente l'utilisation essentielle de ces astrolabes universels.

Imaginons par exemple que l'on veuille connaître les coordonnées équatoriales d'un astre dont on connaît les coordonnées écliptiques. Il suffit de supposer d'abord que le repère de l'astrolabe est de nature écliptique. Après avoir mis la regula horizontale, on pointe alors l'astre en positionnant le brachiolus sur ses coordonnées écliptiques (connues). Sans changer la configuration regula-brachiolus, on amène alors la regula sur une ligne oblique² passant par les arcs $-23,5^\circ$ à gauche et $+23,5^\circ$ à droite – soit une rotation de $23,5^\circ$ dans le sens antihorlogique. Le système de coordonnées est désormais équatorial et on lit simplement les valeurs des coordonnées dans ce nouveau système sur les arcs correspondant à la nouvelle position : l'arc horizontal donne la déclinaison, l'arc vertical l'ascension droite !

Vous cherchez à faire l'opération inverse ? Pas de problème, tout se passe de la même façon, sauf que la rotation de $23,5^\circ$ s'exerce

alors dans le sens horlogique ($-23,5^\circ$ à droite et $+23,5^\circ$ à gauche).

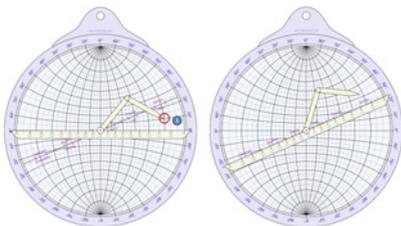
Un cas particulier de cet exercice est de trouver les coordonnées équatoriales du Soleil pour une date donnée. Plus besoin de brachiolus dans ce cas : le Soleil se trouve sur la regula, car sa latitude écliptique est nulle par définition. Le 20 mai, par exemple, le Soleil se trouve à 30° du signe du Taureau. Repérez cette coordonnée sur la regula, puis tournez la regula de $23,5^\circ$ dans le sens antihorlogique, et lisez alors les coordonnées associées à sa position : 20° environ, pour la déclinaison, et 4 h pour l'ascension droite...

b) Déterminer les heures de lever et coucher du Soleil³

Pour pouvoir faire cet exercice, il faut bien comprendre à quoi ressemble le trajet d'un astre sur le tympan de l'astrolabe universel. Si la ligne horizontale centrale représente l'équateur, alors l'horizon forme avec cette ligne un angle égal à la colatitude (c'est-à-dire 90° moins la latitude du lieu). Les trajets du lever à midi, puis de midi au coucher, suivent les arcs horizontaux, pour une déclinaison donnée, depuis l'horizon jusqu'au bord droit et retour (voir figure page suivante).

Pour connaître l'heure du lever du Soleil pour une date donnée, il faut d'abord repérer où il se trouve sur la regula ce jour-là. Par exemple, le 20 mai, il est en 30° du Taureau (soit 0° Gémeaux, ou l'intersection entre les signes Taureau et Gémeaux). Il faut ensuite trouver la déclinaison du Soleil ce jour-là (20° , cf. ci-dessus). Ensuite, il faut positionner l'horizon dans le repère équatorial en tournant la regula dans le sens horlogique d'un angle égal à la colatitude. Repérez alors l'intersection entre la regula et l'arc de déclinaison 20° , et mesurez sa coordonnée avec le repère « heure » : c'est l'heure de lever du Soleil pour ce jour – 4 h pour le Soleil observé depuis Liège le 20 mai.

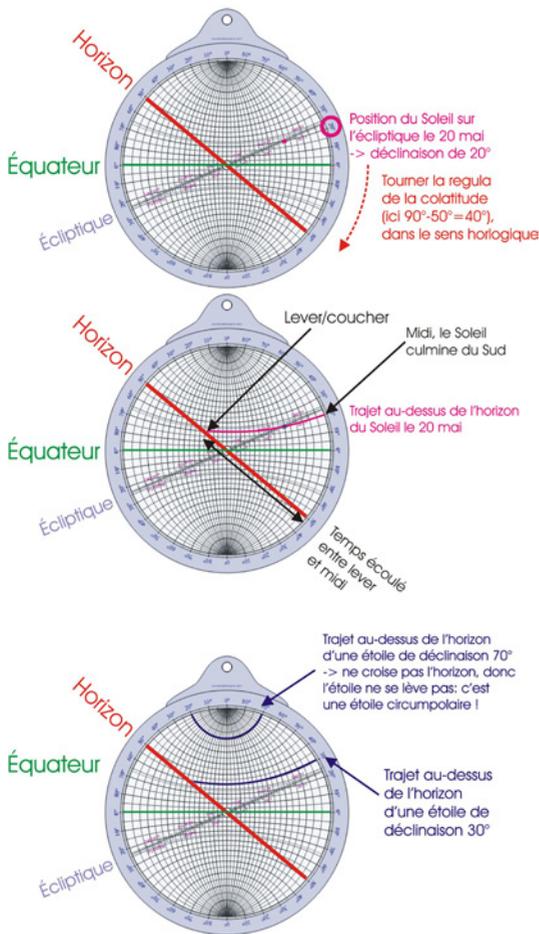
² Cette ligne est souvent dessinée sur les astrolabes universels ; il s'agit de la projection de l'écliptique dans un repère équatorial.



Pour trouver les coordonnées équatoriales, pointer l'astre, puis tourner la regula et le brachiolus de $23,5^\circ$ dans le sens antihorlogique et finalement lire les coordonnées du nouvel endroit pointé par le brachiolus.

³ Comme pour l'exercice de la Fig. 10A dans l'article précédent (*Le Ciel*, sept. 2011, p. 273, voir aussi note en p. 272), l'heure dont il est question ici et dans les exercices (d) et (e) est l'heure solaire vraie, puisque le Soleil intervient. Par contre, l'heure déterminée grâce aux étoiles avec l'astrolabe planisphérique (cf. Fig. 10C p. 273 de l'article précédent) correspond bien à l'heure civile locale.

Repérage des levers, couchers et trajets des astres pour Liège (lat. = 50°) dans un astrolabe universel.



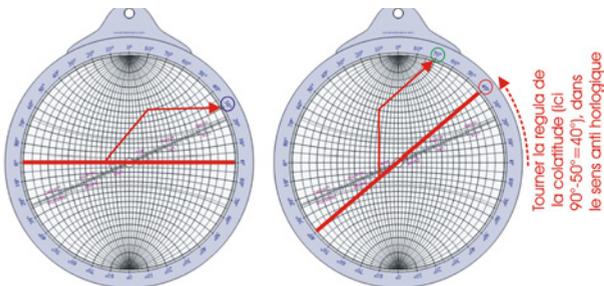
Le processus est évidemment identique pour une étoile de déclinaison connue !

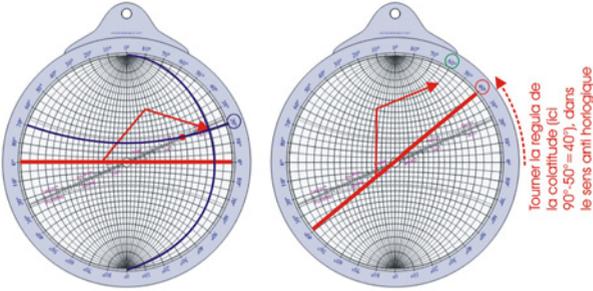
Cet exercice permet aussi de trouver la durée du jour. En effet, la durée lever–midi est identique à la durée midi–coucher. Si l'on connaît l'heure de lever (voir paragraphe précédent), il suffit donc de calculer la différence « 12 h moins heure de lever » et de multiplier par deux. Plus simple encore : pointer le lever du Soleil avec une regula graduée en angle horaire – l'intervalle de temps entre le lever du Soleil et midi s'y lit alors directement ! Pour un astre autre que le Soleil, le processus est identique, il faut juste pointer le brachiolus à la bonne position...

c) Déterminer la hauteur maximale au-dessus de l'horizon d'un astre

Pour ce faire, il faut connaître la déclinaison de l'astre en question. Considérer d'abord un repère équatorial et positionner le brachiolus sur la valeur connue de la déclinaison, côté bord droit – en effet, les astres culminent toujours quand ils passent au Sud et le bord droit représente le méridien Sud dans le repère local. Tourner ensuite tournant l'ensemble brachiolus-regula d'un angle égal à la colatitude dans le sens horlogique, pour passer en coordonnées locales. Le brachiolus indique alors la hauteur maximale atteinte par cet astre.

Trouver la hauteur maximale d'un astre pour un lieu donné (ici, pour Liège, de latitude égale à 50°).





Tourner la regula de la colatitude (ici $90^\circ - 50^\circ = 40^\circ$), dans le sens anti horlogique

Trouver la hauteur du Soleil le 20 mai (déclinaison = 20°) à 12 h 40 si l'on se trouve à Liège (lat. = 50°).

d) Trouver la hauteur du Soleil à un moment donné

Pour ce faire, il faut connaître la déclinaison du Soleil pour la date choisie (voir exemple ci-dessus). Dans ce repère équatorial, positionner le brachiolus à l'intersection entre l'arc horizontal correspondant à cette déclinaison et l'arc vertical indiquant l'heure choisie (utiliser pour ce faire le repère « heures » de la regula). Passer ensuite en coordonnées locales, en tournant l'ensemble brachiolus-regula d'un angle égal à la colatitude dans le sens horlogique. L'arc horizontal passant par la position indiquée par le brachiolus indique la hauteur du Soleil au moment choisi.

L'opération inverse, trouver l'heure grâce à la hauteur du Soleil, est évidemment plus intéressante. En effet, la hauteur du Soleil est mesurée facilement avec l'alidade des astrolabes mais, sans horloge précise, l'heure est difficile à déterminer. Le seul problème, c'est qu'on ne peut faire cette opération directement sur les astrolabes universels. Seule solution : estimer l'heure à vue de nez, et trouver la hauteur pour cette approximation grâce à la méthode ci-dessus. Si la hauteur n'est pas la bonne, il faut choisir une autre heure et recommencer l'opération. Par tâtonnements successifs, on arrive ainsi à déterminer l'heure. Toutefois, l'astrolabe universel ne distingue pas 10h du

matin et 14h de l'après-midi, deux positions symétriques par rapport à midi : il faut donc en plus déterminer si midi est passé ou pas (pour cela, utiliser son estomac...).

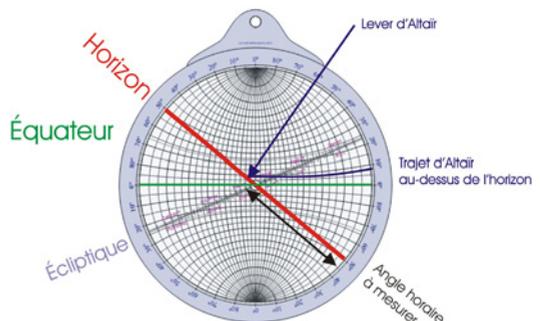
e) Déterminer l'heure de nuit grâce à la hauteur d'une étoile

Pour cette opération, on a besoin de connaître les coordonnées équatoriales (ascension droite et déclinaison) de l'étoile en question, ainsi que l'ascension droite du Soleil pour la date choisie (voir exemple ci-dessus).

Le début de cette opération est similaire à celle évoquée ci-dessus pour le Soleil. Il faut choisir une heure, déterminer la hauteur de l'astre pour cette heure-là, et itérer jusqu'à ce que la hauteur trouvée corresponde à la réalité. Une fois la bonne heure déterminée, il suffit de mesurer la position de l'étoile en utilisant le repère « angle horaire » de la regula. Notez que si la hauteur est nulle (l'étoile se lève ou se couche), l'opération est simplifiée (voir figure ci-dessus).

Cependant, il faut se souvenir que les étoiles et le Soleil ne tournent pas, vus de la Terre, à la même vitesse : 23 h 56 minutes pour les unes, 24h pour l'autre. Il faut du coup

Trouver l'heure lorsque Altair (RA = 20 h, déclinaison = 9°) se lève sur l'horizon liégeois (lat. = 50°) le 20 mai (RA solaire = 4 h). L'angle horaire vaut -7 h, ce qui conduit à une heure de $12 + (-7) + (20 - 4) = 21$ h.





corriger l'angle horaire mesuré. La correction vaut la différence des ascensions droites : l'heure réelle vaut donc $12\text{h} + \text{angle horaire mesuré} + (\text{RA étoile} - \text{RA Soleil})$. Notons qu'il faut ajouter 12h car l'angle horaire est nul à midi. Comme pour le Soleil, il existe une ambiguïté : il faut savoir si l'étoile a passé le méridien Sud ou non (l'angle horaire est respectivement positif ou négatif dans ce cas).

Une belle idée, mais...

Les astrolabes universels ont été peu utilisés, et ce pour diverses raisons. Tout d'abord, la vision du ciel est inhabituelle – on le voit « de côté », pas du dessus ou du dessous comme on en a l'habitude dans les cartes du ciel. D'autre part, comme vous avez pu le constater, il n'est pas simple de jongler avec

Une solution combinant les deux : orthographique à gauche et stéréographique à droite. Il est visible au musée d'histoire des sciences de Florence ainsi qu'au musée Galilée (© Musée Galilée).

cet outil. Les courbes peuvent prendre jusqu'à trois significations différentes, ce qui impose une gymnastique intellectuelle complexe... Le fonctionnement de l'astrolabe planisphérique est beaucoup plus intuitif, et n'exige qu'un entraînement modeste pour apprendre à le manier. En outre, pour une même taille d'objet et une même qualité de gravure, l'astrolabe planisphérique donne des résultats plus précis.

Ensuite, déterminer l'heure ne se fait pas de manière simple. Comme vu plus haut, il faut itérer, ce qui n'est jamais très pratique ! Enfin, ces astrolabes universels sont apparus

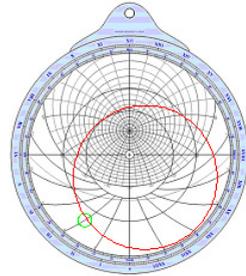
assez tardivement – surtout celui de La Hire, qui n'a été réalisé qu'en très peu d'exemplaires. À cette époque (17^e s.), les astrolabes commencent en effet à tomber en désuétude : ce sont désormais des lunettes qui observent le ciel, et la qualité des horloges s'est tellement améliorée qu'il n'y a plus besoin d'utiliser le ciel à tout moment pour connaître l'heure avec une bonne précision.

Malgré leur ingéniosité, les astrolabes universels n'atteignent donc jamais le succès de leurs cousins...

Quelques précisions sur la première partie

Au niveau histoire, on peut ajouter quelques informations à ce qui a été dit dans la première partie de cette série. On sait que la projection stéréographique était connue il y a au moins deux mille ans – Ptolémée lui-même en parle. Par contre, le plus vieux traité de l'astrolabe dont on ait trace est celui que Théon d'Alexandrie écrivit vers 375 : il a eu une influence certaine chez les Arabo-musulmans, mais il n'en reste aujourd'hui aucun exemplaire. Le plus ancien traité que l'on possède encore est celui de Jean Philoppon (390–470). Il liste onze problèmes pouvant être résolus avec un astrolabe. Toutefois, son engin ne comporte que les almicanarats (les lignes de hauteur au-dessus de l'horizon). Ce sont les Arabo-musulmans qui vont ajouter les autres lignes au 9^e s. : azimuts, carré des ombres et quadrants des sinus seront l'œuvre du mathématicien Al-Khwarizmi (dont le nom déformé donna « algorithme »), et ses collègues ajouteront à la même époque calendrier zodiacal et ligne crépusculaire. C'est seulement avec tous ces raffinements que l'astrolabe devient la merveilleuse calculatrice que l'on connaît.

Côté utilisation, deux remarques doivent être faites. Tout d'abord, pour la mesure de l'ascension droite : si l'on place l'étoile considérée au Sud (« midi »), l'heure correspondant au point vernal est l'ascension droite... à 12 h près : si vous lisez 16 h, l'ascension droite vaut en fait 4 h, et si vous lisez 5 h, l'ascension droite vaut en fait 17 h. Pour éviter ce désa-



Sur cette figure, l'écliptique apparaît en rouge. Les lignes des heures inégales sont les courbes sous l'horizon. Une fois le ciel observé reproduit sur l'astrolabe, il faut simplement voir quelle courbe horaire le Soleil intercepte (solution en vert).

grément, on peut plutôt placer l'étoile sur le méridien Nord (« minuit »).

D'autre part, certains astrolabes possèdent des lignes d'heures inégales sur le recto de l'astrolabe. Il s'agit de courbes apparaissant sous l'horizon. Elles permettent de déterminer l'heure inégale nocturne, tout comme le verso de l'astrolabe donnait l'heure inégale diurne (voir détails dans le premier article). Pour ce faire,

1. tourner le rete jusqu'à voir la situation observée (Véga au Sud, Sirius 10° au-dessus de l'horizon, etc.)
2. repérer ensuite la position du Soleil sur l'écliptique correspondant à la date du jour
3. trouver quelle courbe d'heure inégale est la plus proche de cette position solaire
4. ces lignes peuvent même servir à trouver l'heure inégale diurne – pour ce faire, il faut d'abord positionner le rete, puis regarder à quelle courbe d'heure inégale correspond l'opposé du Soleil (c'est-à-dire la position de l'écliptique située six mois après la date du jour).

Enfin, si vous voulez voir une collection de jolis astrolabes, visitez les sites <http://www.mhs.ox.ac.uk/astrolabe/> du musée d'histoire des sciences d'Oxford et <http://catalogue.museogalileo.it/indepth/Astrolabe.html> du musée Galilée de Florence.